

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0550

李冬, 陈蕾, 夏阳, 等. 2014. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报, 34(9): 2384-2391

Li D, Chen L, Xia Y, et al. 2014. The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(9): 2384-2391

生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响

李冬¹, 陈蕾^{2,3}, 夏阳^{2,3}, 宋晓娜^{2,3}, 刘旻慧^{2,3}, 郑浩^{2,3,*}

1. 宁夏农林科学院种质资源研究所, 银川 750002

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100

3. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100

收稿日期: 2013-11-24

修回日期: 2013-12-18

录用日期: 2013-12-20

摘要: 生物炭技术是近年来新兴的具有多重农业和环境效益的土壤改良技术。本研究以宁夏低质淡灰钙土为研究对象, 以“中白 78”小白菜 (*Brassica chinensis*) 为供试作物, 分别按 0、1.5%、3% 和 5% (质量分数) 的比例添加花生壳生物炭 (Biochar, BC) 和基于花生壳生物炭研发的生物炭改良剂 (BC-based amendment, AD), 系统研究了 BC 和 AD 对小白菜植株生长、产量及土壤养分利用有效性的影响。结果表明: BC 和 AD 的添加均增加了小白菜的株高和产量, 与 BC 相比, AD 对小白菜的增产效果更为显著 (BC 和 AD 处理的产量分别为对照的 2.34~3.77 倍和 4.37~4.60 倍)。各剂量 BC 处理中, 小白菜地上部、根系生物量的顺序为 1.5%BC>3%BC≈5%BC; 而对于 AD 处理, 3 种添加量处理的小白菜生物量无显著性差异。增产的主要原因包括两方面: 第一是两种材料中主要养分对小白菜生长的直接贡献; 第二则是两种材料均促进了小白菜根系的生长, 增强了根际效应, 从而改变了 N、P 等土壤养分的利用有效性。BC 和 AD 的加入均增加了小白菜对 N 的利用有效性, AD 促进了小白菜对 P 的利用有效性。可见, BC 和 AD 均可作为土壤改良剂, 改善宁夏低质淡灰钙土的养分状况, 提高作物产量。

关键词: 生物炭; 小白菜; 产量; 土壤养分; 根际; 养分利用有效性

文章编号: 0253-2468(2014)09-2384-08

中图分类号: X53

文献标识码: A

The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia

LI Dong¹, CHEN Lei^{2,3}, XIA Yang^{2,3}, SONG Xiaona^{2,3}, LIU Minhui^{2,3}, ZHENG Hao^{2,3,*}

1. Ningxia Academy of Agro-Forestry Sciences, Germplasm Resources Research Institute, Yinchuan 750002

2. Ocean University of China, College of Environmental Science and Engineering, Qingdao 266100

3. The Key Lab of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100

Received 24 November 2013;

received in revised form 18 December 2013;

accepted 20 December 2013

Abstract: The biochar technology has become a promising technology for soil amelioration due to its multiple agricultural and environmental benefits. Biochar sample (BC) and BC-based amendment was developed, and added into the poor quality soil (light Sierozem) collected from Ningxia Hui Autonomous Region with the rates of 0, 1.5%, 3% and 5%, respectively. Chinese cabbage Zhongbai 78 (*Brassica chinensis*) was chosen as the test plant, and the effect of BC and AD on its growth, yield and nitrogen (N) and phosphorus (P) utilization efficiency was investigated, as well as rhizosphere effect. The results indicated that the cabbage height and yield significantly increased in BC and AD treatments, and more significant in AD treatment compared with that of BC. These positive effects is possibly due to the direct nutrient contributions from BC and AD, as well as the enhanced rhizosphere effect resulted from adding of BC and AD. The N utilization efficiency was enhanced in both BC and AD treatments, but P utilization efficiency was enhanced only in AD treatments. Therefore, BC and AD may be used as the poor quality soil amendments to improve nutrient utilization efficiency and thus to increase crop yield.

Keywords: biochar; Chinese cabbage; yield; soil nutrient rhizosphere; nutrient utilization efficiency

基金项目: 中国博士后基金 (No.2014M550374); 宁夏回族自治区科技支撑计划项目 (No.2013Zys149); 宁夏农林科学院自主研发项目 (No.nkyg-13-11)

Supported by the Chinese Postdoctoral Science Foundation (No.2014M550374), the Ningxia Science-technology Support Plan Projects (No.2013Zys149) and the Indigenous Programs from Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences (No.nkyg-13-11)

作者简介: 李冬 (1968—), 女, E-mail: 237069179@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhenghao2013@ouc.edu.cn

Biography: LI Dong (1968—), female, E-mail: 237069179@qq.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhenghao2013@ouc.edu.cn

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

1 引言(Introduction)

宁夏淡灰钙土广泛分布于宁夏中北部,土壤有机质、氮、磷等养分含量极低,是宁夏地区乃至西北地区农业生产中主要的低质和障碍型土壤(金国柱等,2000).但随着人口的增加及粮食需求的加剧,淡灰钙土目前已成为宁夏重点开发利用的耕地资源.同时,现代灌溉技术的发展,使得更多的淡灰钙土成为宁夏综合发展农、林、牧、果及经济作物的重要基地.然而,有效的土壤改良技术的缺乏又严重限制了该类土壤的可持续开发.近年来兴起的生物炭技术为宁夏低质淡灰钙土壤的改良提供了一种新思路 and 途径.

生物炭(Biochar)是生物质在限氧条件下热解($\leq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$)形成的一种性质稳定的富含炭的材料(Lehmann *et al.*, 2009),其在改善土壤质地和肥力(陈红霞等,2011;张千丰等,2012)、增加作物产量(张明月, 2012; 张伟明, 2012)、固定大气中 CO_2 (姜志翔等, 2013)、实现废弃生物质资源化利用(王震宇等, 2013)等方面具有多重效益,已成为农业、环境、能源等众多领域的研究热点.Spokas 等(2011)的报道指出,只有 50%的研究中生物炭使作物增产,而其余 50%的研究显示其对作物增产没有影响,甚至减少了作物产量.生物炭对于作物产量的减少作用主要是由于生物炭矿质养分含量较低,能直接供给土壤的养分很少,仅在氮含量很低或极贫瘠的土壤上才能明显提高产量(Lehmann *et al.*,

2003;Verheijen *et al.*, 2010).为了弥补生物炭对土壤养分的耗竭,在生物炭加入土壤的同时施加一定量的肥料,这对于作物的增产效果显著(Major *et al.*,2010;崔月峰等,2008).因此,将生物炭与肥料复合制备成生物炭改良剂已成为生物炭在农业领域一个新的研究方向.生物炭改良剂作为肥料缓释或控释的绿色环保材料,不仅可以起到土壤改良和固碳的作用,还能负载和吸附养分,减少土壤养分淋失,弥补生物炭养分不足的缺陷,同时赋予了肥料缓释和固碳的功能(高海英等,2013;何绪生等,2011).生物炭与肥料复合的方法主要有掺混、包膜、吸附及反应等工艺,其中,掺混是目前制备生物炭改良剂最简单的方法(高海英,2013).

基于此,本研究以花生壳为原料制备生物炭,同时采用掺混法制备一种基于花生壳生物炭的土壤改良剂,采用盆栽试验系统研究生物炭及其改良剂对宁夏低质淡灰钙土壤养分可利用性,以及小白菜生长及产量的影响,以期生物炭技术在宁夏及西北地区低质土壤改良中的应用提供科学依据和技术支撑.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 土壤

供试土壤取自贺兰山东麓银川市西夏区($38^{\circ}38'\text{N}$, $106^{\circ}08'\text{E}$)精品果园基地表层($0\sim 20\text{ cm}$),土壤为淡灰钙土,供试土壤基本性质见表 1.采集土壤风干后过 2 mm 筛备用.

表 1 供试土壤化学性质
Table 1 Chemical characteristics of soil

pH	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	盐度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
8.46	15	0.77	6.23	NA	0.58	20

注:NA 表示未在风干土中检测到.

2.2 生物炭及其改良剂的制备

试验所用生物炭(BC)以花生壳为原料,在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下厌氧热解 2 h (Zheng *et al.*, 2013a; 2013b),获得的 BC 经粉碎过 2 mm 筛备用.生物炭改良剂

(AD)以 BC、花生壳粉末、硝酸铵、水等为原料,按照一定比例混合堆制 30 d 后,自然风干备用.供试 BC 和 AD 的基本理化性质如表 2 所示.

表 2 生物炭(BC)和生物炭改良剂(AD)的理化性质
Table 2 The properties of biochar sample(BC) and BC-based amendment(AD)

样品	pH	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	灰分
BC	8.52	24.6	5.01	441	28.6%
AD	8.43	170	1443	793	47.6%

2.3 盆栽试验

试验采用 20 cm×20 cm(直径×高)的塑料花盆,随机区组排列.试验设 7 个处理:BC 和 AD 的添加比例分别为 0、1.5%、3%和 5%(相当于每公顷加入 0、3.15、6.3 和 10.5 t),各处理分别记做 CK(空白对照)、1.5%BC、3%BC、5%BC、1.5%AD、3%AD 和 5%AD.每个处理设 4 个重复.将供试土壤和 BC 或 AD 按比例混合均匀后,每个花盆装入 2.0 kg,土壤含水量为土壤最大持水量的 60%.

供试植物选用“中白 78”小白菜,采用育苗移栽法,育苗 10 d 后移栽,每盆移苗 3 棵.缓苗 2 周后,每 5 d 测定株高.移苗 40 d 后,采集植物和土壤样品,植物样品分为地上部和地下部,采用抖根法采集根际土壤样品(Wang *et al.*, 2011),土壤样品风干后,过 2 mm 筛备用.

2.4 样品分析

BC 和 AD 的 pH 按照 1:20(*m/V*, g/mL)的比例在蒸馏水中振荡 24 h 后用便携式 pH 计测定;将 BC 置于 750 °C 马弗炉中 4 h 后,待燃烧完全后测定灰分含量. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量采用靛酚蓝比色法测定, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量采用钼锑抗比色法测定.

植物样品用自来水冲洗晾干后,测定其鲜重,然后立即放入 105 °C 烘箱中杀青 30 min,再置于 60

°C 烘箱中干燥至恒重,称量其干物重.植物样品全氮(TN)含量测定采用半微量开氏蒸馏法,全磷(TP)含量测定采用钼锑抗比色法.

土壤 TN 含量采用半微量开氏蒸馏法测定,TP 含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解-钼锑抗比色法测定;pH 按土水比 1:2.5(*m/V*, g/mL)测定,上述植物和土壤样品的测定方法均参考文献(鲍士旦, 2000)方法.

2.5 数据分析

所有试验数据的统计分析利用 Excel 2010 软件,显著性分析采用 DPS7.05 软件.

3 结果分析(Results analysis)

3.1 BC 和 AD 对小白菜生长的影响

3.1.1 小白菜株高 BC 和 AD 对小白菜生长期不同阶段株高的影响不同(图 1).BC 处理中,在生长期的前 25 d,只有 5%BC 处理显著增加了小白菜株高;25 d 后,所有 BC 处理均显著增加了小白菜植株株高($p<0.05$).小白菜收获时(第 39 d),添加 BC 的处理比对照植株株高增加了 37.3%~64.3%.对于 AD 处理,生长期的前 25 d,只有 1.5%AD 处理显著增加了小白菜的株高;25 d 之后,所有添加 AD 的处理均显著增加了植株株高.收获时,与对照相比,添加 AD 处理使小白菜株高增加了 22.8%~57.7%.

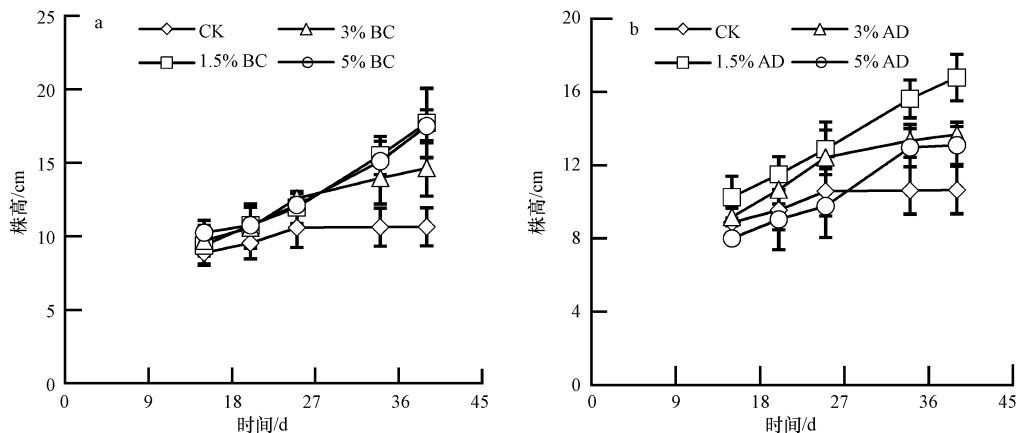


图 1 生物炭(a)和生物炭改良剂(b)对小白菜株高的影响

Fig.1 The effect of BC (a) and AD (b) adding on the height of Chinese cabbage

3.1.2 小白菜植株生物量 BC 和 AD 对小白菜植株生物量的影响如图 2 所示.在所有添加量处理中,BC 和 AD 均显著增加了小白菜根系和地上部生物量(以干重计)($p<0.05$).与 CK 相比,BC 处理的小白菜地上部生物量增幅达 134%~277%,根系生物量增幅为 100%~187%;AD 处理的小白菜地上部生物量增幅达 337%~360%,根系生物量增幅为

239%~281%.随着 BC 和 AD 添加量的增加,小白菜生物量表现出不同的变化趋势.对于 BC 处理,小白菜地上部、根系生物量的顺序为 1.5%BC>3%BC≈5%BC;而对于 AD 处理,3 种添加量处理的小白菜生物量无显著性差异.添加量相同时,AD 处理对地上部和根系生物量的增加效果较 BC 处理更为明显.如当 BC 和 AD 添加量高于≥3%时,AD 处理中的总

生物量约是 BC 处理的 2 倍,表明 AD 较 BC 对小白菜的增产效果更强.

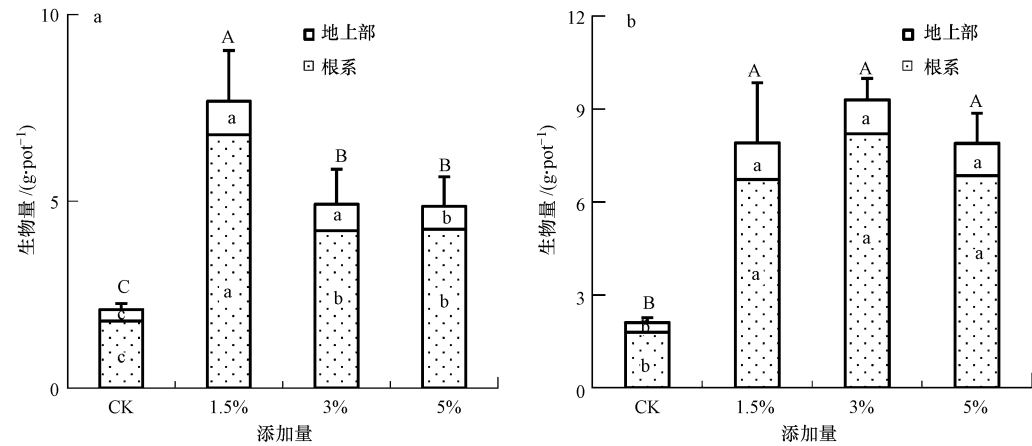


图 2 生物炭(a)和生物炭改良剂(b)对小白菜生物量的影响(不同小写字母表示不同添加量处理之间植株地上部或地下部干重存在显著性差异;不同大写字母表示不同处理之间植株总干重存在显著性差异)

Fig.2 The effect of BC (a) and AD (b) adding on the dry biomass of Chinese cabbage

3.1.3 小白菜养分吸收 生物炭处理对小白菜养分吸收影响的研究结果表明(图3),与对照相比,BC处理的植株地上部和根系TN含量无显著性差异;对于AD处理,1.5%添加量处理的小白菜地上部TN含量与CK相比无显著变化,根系TN含量显著

增加,而5%添加量处理会显著增加地上部和根系TN含量,增幅达42.9%~111%.表明相对于BC,AD处理更能促进小白菜植株对土壤N素的吸收和累积,其对N素的累积量是BC处理的3.89倍.

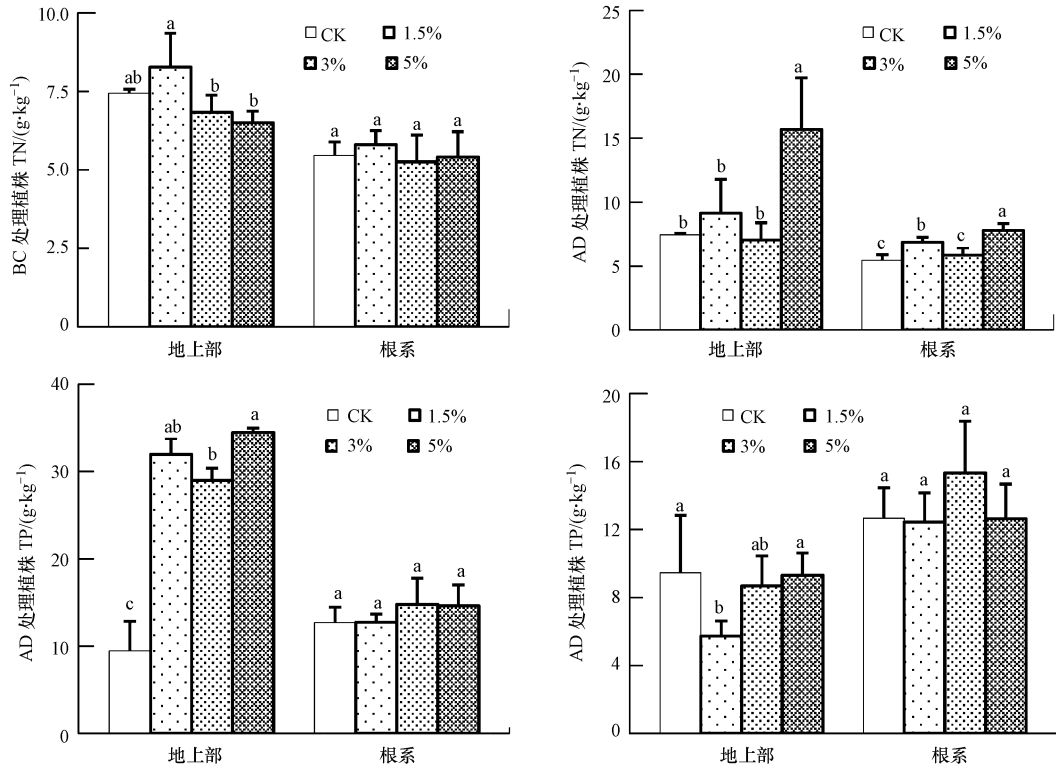


图 3 生物炭和生物炭改良剂对小白菜植株中 N 和 P 的影响

Fig.3 The effect of BC and AD adding on N and P content in Chinese cabbage

BC 和 AD 处理的小白菜对 P 的吸收表现出与 N 不同的吸收特性.所有 BC 和 AD 处理对植株根系 TP 含量无显著影响,而 BC 处理可增加植株地上部 TP 含量,增幅达 206%~264%,AD 处理中,除 1.5% AD 处理地上部 TP 含量较对照显著降低外(降幅达 39%),其余无显著变化,表明 AD 对小白菜根系 P 素吸收影响不大.在相同的添加量下,BC 处理与 AD 处理相比,根系 TP 含量无显著性差异,而 AD 处理地上部 TP 含量显著低于 BC 处理,这可能是因为 AD 处理后地上部生物量的增大导致的稀释效应.

3.2 BC 和 AD 对土壤的根际效应

3.2.1 根际 pH 生物炭对小白菜根际土壤 pH 的影响如图 4 所示.BC 处理中,当添加量 $\geq 3\%$ 时,非根际土壤的 pH 显著增加 0.30,而所有 BC 处理中根际土壤的 pH 无明显变化,这与 AD 处理中根际土壤的 pH 变化一样,而非根际土壤的 pH 则在 AD 添加量 $\geq 3\%$ 时显著降低了 0.24.此外,除 3% 的添加量外,其余相同添加量下,BC 和 AD 对根际土壤 pH 的影响无显著性差异,而 AD 处理中的非根际土壤 pH 显著低于 BC 处理,表明 AD 较 BC 明显降低了小白

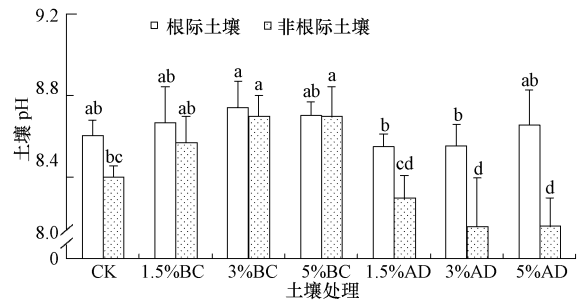


图 4 生物炭和生物炭改良剂对土壤 pH 的影响

Fig.4 The effect of BC and AD adding on soil pH

菜非根际土壤的 pH.这说明 BC 和 AD 的添加导致了小白菜不同的根际效应.

3.2.2 根际 N 和 P BC 和 AD 对土壤 TN 和 TP 含量的影响见图 5.从图中可以看出,BC 和 AD 对该土壤 TN 含量的影响不同.除 5%BC 添加量外,不同 BC 添加量对非根际土壤 TN 含量无显著影响,而均显著增加了根际土壤中 TN 的含量,增加量为 24.6%~37.7%,且不同添加量之间无显著性差异(图 5a).AD 处理中,当添加量为 1.5% 时,其对根际土壤的

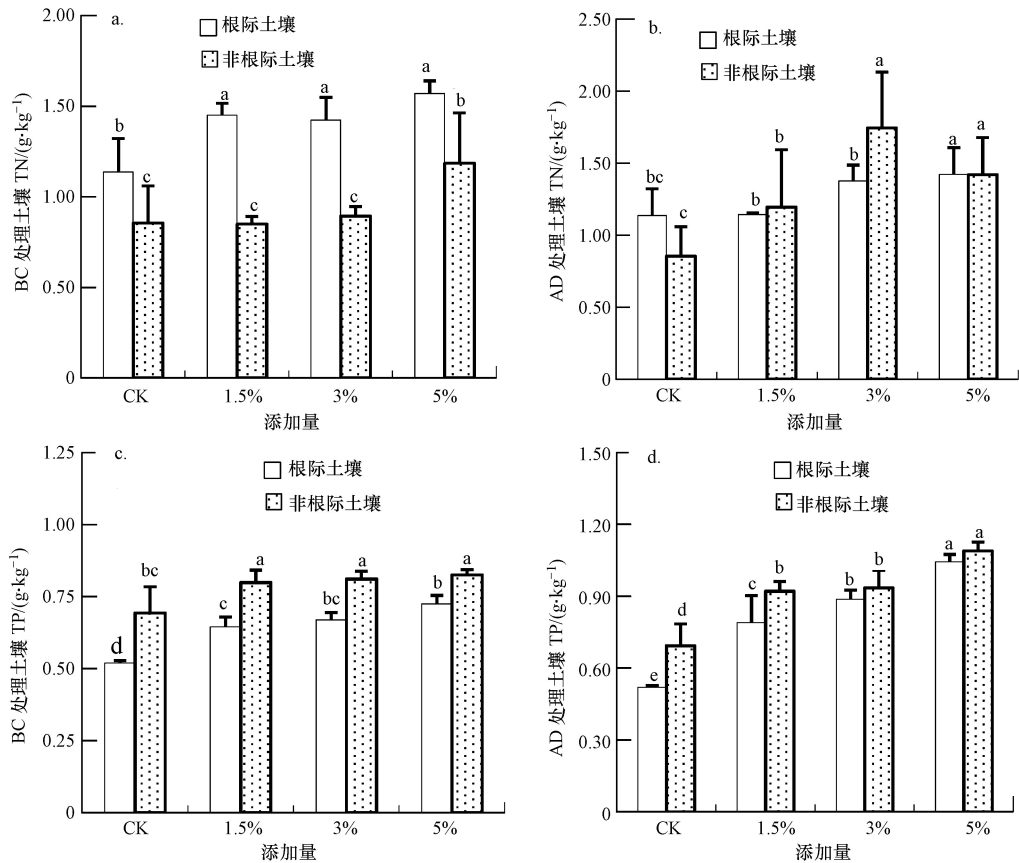


图 5 生物炭和生物炭改良剂土壤 N 和 P 的影响

Fig.5 The effect of BC and AD adding on the content of N and P in the soil

TN 含量无影响;而显著增加了非根际土壤 TN 含量;当添加量 $\geq 3\%$ 时,非根际土壤和根际土壤的 TN 含量均显著增加,增加量分别为 $59.3\% \sim 65.1\%$ 和 $21.1\% \sim 24.6\%$ (图 5b)。

BC 和 AD 对根际土壤和非根际土壤 TP 的影响也明显不同(图 5c,d),BC 和 AD 的添加均显著增加了根际土壤和非根际土壤中 TP 的含量.BC 处理后的根际土壤 TP 含量增幅为 $23.9\% \sim 39.4\%$,非根际土壤为 $15.8\% \sim 19.7\%$;与 BC 处理相比,AD 处理的根际土壤和非根际土壤 TP 含量增幅更为明显,分别达 $51.8\% \sim 100\%$ 和 $33.6\% \sim 58.0\%$ 。另外,AD 处理中,根际土壤和非根际土壤的 TP 含量随着 AD 添加量的增加而增加。

4 讨论(Discussion)

4.1 生物炭对作物生长及产量的影响

早在 19 世纪,科学家们就开始关注土壤中添加生物炭对土壤改良及作物产量的影响(Lefroy, 1873),并建议在土被下慢速焖烧生物质然后施加入到土壤中(施加量约 $0.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)来改善土壤农业性能.巴西亚马逊河流域“印第安黑土”(Terra Preta)的发现,引起了学者们对生物炭在农业领域中应用的关注(Glaser *et al.*, 2001).随着人们对生物炭认识和研究的不断深入,生物炭在农业生产上的应用也逐渐受到重视(Spokas *et al.*, 2011; 陈温福等, 2013; 袁金华等, 2012; 袁艳文等, 2012).迄今为止,在水稻、玉米、高粱、小麦、大豆、花生、豇豆、萝卜、菠菜、西红柿、辣椒等作物上都已有了生物炭促进其生长的报道(Graber *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2011; 陈温福等, 2013; 张晗芝等, 2010; 张伟明等, 2013).Lehmann 等(2003)模仿亚马逊流域高产的“Terra Preta”土壤,将生物炭分别以 68 和 $135 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的添加量混入土壤中,发现水稻和豇豆的生物量提高了 $38\% \sim 45\%$.Graber 等(2010)在栽培基质中(椰子纤维和凝灰岩混合物)中加入 $1\% \sim 5\%$ 的柑橘木生物炭后,辣椒植株生物量增加了 $28.4\% \sim 228.9\%$,果实产量提高了 $16.1\% \sim 25.8\%$.本研究也表明,不同添加量的 BC 和 AD 均在一定程度上增加了小白菜株高,表明二者对小白菜的生长均起到了促进作用.BC 和 AD 促进株高的效果均在小白菜生长后期更为明显,其中 BC 效果更佳;进一步的研究发现,两种添加剂均提高了小白菜的生物量,对小白菜具有显著的增产效果,且 AD 的增产效

果明显强于 BC。

然而,生物炭对作物生长的效应并不一致.Spokas 等(2011)综述了近年来生物炭对作物产量的影响,发现其中约 50% 的研究中生物炭促进了作物的生长, 30% 则无影响,而其余 20% 甚至减少了作物的产量.这些研究中使用的生物炭和土壤类型众多,表明一种生物炭并不能解决所有的土壤问题(Novak *et al.*, 2013).因此,针对具体土壤的特定问题,开发“功能生物炭”成了当前生物炭在农业领域的重要研究方向,生物炭改良剂的研发正是基于“功能生物炭”的理念。

生物炭改良剂研发的重要内容之一是探究生物炭与肥料的相互作用,目前已获得了积极反馈(陈温福等, 2013; 何绪生等, 2011; 张喜娟等, 2013).Chan 等(2007)研究发现,以 50 和 $100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的添加量加入生物炭的同时在土壤中加入 N 肥($100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),萝卜的产量分别提高了 95% 和 120% ,显著高于单独添加生物炭.在国内,研究者将生物炭与化肥混合,发明了专用炭基肥料(高海英, 2013; 何绪生等, 2011).崔月峰等(2008)对颗粒炭及以炭为基质的两种新型缓释肥在玉米生产上的效应进行了研究,发现添加颗粒炭的普通肥料和新型缓释肥都能有效地改善玉米的农艺性状,使叶面积、根数等有所增加,玉米产量提高了 $7.6\% \sim 11.6\%$.本研究设置了 BC 中添加了 N 肥等添加剂的 AD 处理,发现 AD 处理对小白菜的增产效果比 BC 处理更强,增产效果约为 BC 的 2 倍(图 2).然而,生物炭改良剂的研究及应用在生物炭领域刚刚起步,基础还十分薄弱。

生物炭对作物生长及产量的影响还与作物种植时间密切相关,其生长随时间的延长表现出一定的累加效应(陈温福等, 2013).Major 等(2010)进行的多年连作试验表明,施用 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭的土壤,第 1 年玉米产量并未提高,但在随后的 3 年中产量逐年递增,分别比对照提高了 28% 、 30% 和 140% .而本研究中,小白菜的生长时间较短,仅 1 个多月,且单季种植,未进行连续栽培.因此,在此类低质土壤上,生物炭对小白菜增产是否存在时间的累加效应还待进一步研究.另外,土壤类型也与生物炭对作物产量的影响密切相关.目前,关于生物炭对作物增产的研究国际上主要集中在热带高度风化的土壤区域,国内主要集中在南方酸性土壤上,而我国西北地区大量存在的障碍性土壤(如宁夏低质淡灰钙

土)和中低产田的相关研究极少.

4.2 生物炭影响作物生长的可能机制

生物炭对作物生长发育和产量影响的效应表现不一,但总体来说是正向效应大于负向效应 (Manyà, 2012; Spokas *et al.*, 2011; 陈温福等, 2013).产生正向效应的原因主要来自以下几个方面:①生物炭自身含有一定数量的对作物生长发育有益的元素(如 N、P、K、Ca 等),可为作物生长发育提供良好的养分供应 (Zheng *et al.*, 2013b).本研究中,BC 和 AD 中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 24.6、170 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量分别为 441 和 170 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,灰分含量分别为 28.6%和 47.6% (表 1),表明 BC 和 AD 中含有大量的可利用性养分,而且 AD 中的养分含量显著高于 BC,这可能是 BC 和 AD 提高小白菜产量,同时 AD 增产效果更为明显的主要原因之一.②施用生物炭有助于改善土壤理化性状,如 pH、容重、孔隙度、持水性等,这些条件的改变对于促进作物生长发育有重要作用 (Zheng *et al.*, 2013a; 袁金华等, 2012; 张明月, 2012; 张伟明, 2012).本研究也发现,BC 处理中非根际土壤 pH 增加,AD 处理的非根际土壤 pH 降低 (图 4),这主要是由 BC 和 AD 性质的差异引起的.BC 中的灰分物质易引起土壤 pH 升高 (表 2) (袁金华等,2012),虽然 AD 的灰分含量较高,但其含有的硝酸铵及花生壳在土壤中的降解均会引起土壤 pH 的下降.然而,BC 和 AD 处理中,根际土壤与对照相比未发生显著变化,这表明 BC 和 AD 对小白菜产生了不同的根际效应.BC 处理中,由于 BC 的添加引起了非根际土壤 pH 的增加,从而使土壤 N、P 等养分的可利用性暂时降低,导致土壤中养分的短暂亏缺;在此胁迫条件下,小白菜根系分泌质子和有机酸的强度增加,抵消掉了 BC 的添加导致的根际土壤 pH 的增加,最终确保了小白菜养分的正常供应 (张福锁, 1993).然而,AD 较 BC 养分含量高 (表 2),在土壤中不会导致 N、P 等养分的亏缺,小白菜根系吸收的氮素以硝态氮为主,根系分泌出 OH^- 或 HCO_3^{2-} 使根际 pH 值升高 (范晓晖等,1992).宁夏低质土壤较高的 pH 是其除养分含量较低外影响作物生长的主要原因.AD 的添加使土壤的 pH 得到了一定程度的降低 (8.15 ~ 8.29),更接近于小白菜种植的最适 $\text{pH}=7.0$,这也可能是小白菜产量增加的又一原因.③生物炭属于多孔碳质材料,比表面积较大,在施入土壤后,可为微生物生长提供 C 源和栖息微环境,从而有利于微

生物的生存繁衍,增加土壤中有益菌群数量,增强土壤生态系统功能,为作物根系提供良好的生长环境 (Lehmann *et al.*, 2011; 陈温福等, 2013; 王震宇等,2013).本研究中,BC 和 AD 均促进了小白菜根系的生长 (图 2),有待进一步证实生物炭是否加强了土壤微生物的作用.④生物炭可通过为植物根系提供养分、改变土壤物理化学性质、调节土壤微生物群落结构等直接和间接作用,促进植物根系生长,扩大植物根际微域,增强植物根际效应,这样则可提高土壤养分利用效率,促进作物增产 (Prendergast-Miller *et al.*, 2014).本研究中,BC 和 AD 均增加了小白菜根系干物重,表明了两者都扩大了小白菜的土壤根际微域.因此,也提高了 N 的利用有效性 (表 3),并分别在 BC 为 1.5%、AD 为 3% 时达到最大, N 的利用有效性增幅达 250% 和 396%,表明 BC 和 AD 处理后,减少了小白菜生长对 N 肥的需求量.另外,BC 对 P 的养分利用有效性无影响,而 AD 增强了其养分利用有效性 (表 3).生物炭增强土壤中养分的利用有效性,这将会带来潜在的、巨大的农业和环境效益.通过减少肥料的施用,降低粮食生产成本,减轻土壤 N_2O 等的释放,降低面源污染的风险等.与 BC 相比,AD 更适宜于在此类低质土壤中施用.

表 3 生物炭和生物炭改良剂对小白菜养分利用有效性的影响

Table 3 The effect of BC and AD adding on N and P availability

处理	N 利用有效性/ ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	P 利用有效性/ ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)
CK	0.24 ^d	0.21 ^c
1.5%BC	0.84 ^b	0.21 ^c
3%BC	0.63 ^{bc}	0.15 ^c
5%BC	0.65 ^{bc}	0.12 ^c
1.5%AD	0.76 ^b	1.19 ^a
3%AD	1.19 ^a	0.96 ^{ab}
5%AD	0.45 ^{cd}	0.75 ^b

5 结论 (Conclusions)

在宁夏低质土壤中添加 BC 和 AD 能够增加小白菜株高,与对照相比,株高分别增加了 37.3% ~ 64.3%和 22.8%~57.7% (39 d).在所有添加量处理中,BC 和 AD 均显著增加了小白菜根系和地上部生物量.BC 处理中,小白菜地上部、根系生物量的顺序为 1.5%BC>3%BC≈5%BC,而 AD 处理中,3 种添加量的小白菜生物量无显著性差异.BC 和 AD 养分的

直接贡献及其引起的根际效应的增强是小白菜增产的主要原因。BC 和 AD 引起的根际效应的增强,均增加了小白菜对 N 的养分利用有效性,但只有 AD 增加了小白菜对 P 的养分利用有效性,BC 对 P 的养分利用有效性无影响。综上所述,BC 和 AD 均可以作为改良宁夏低质淡灰钙土的改良剂,且 AD 的效果更佳。

责任作者简介:郑浩(1983—),男,讲师。主要研究方向是生物质资源化利用及其环境效应、污染物的环境行为及过程控制。

参考文献(References):

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社
- Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 45(8): 629-634
- 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 2011. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. *应用生态学报*, 22(11): 2930-2934
- 陈温福, 张伟明, 孟军. 2013. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 46(16): 3324-3333
- 崔月峰, 曾雅琴, 陈温福. 2008. 颗粒炭及新型缓释肥对玉米的应用效应研究[J]. *辽宁农业科学*, (3): 5-8
- 范晓晖, 刘芷宇. 1992. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展[J]. *土壤通报*, 23(5): 238-240
- 高海英, 陈心想, 张雯, 等. 2013. 生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, (4): 13-19
- Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, *et al.* 2001. The *Terra Preta* phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 88(1): 37-41
- Graber E R, Meller Harel Y, Kolton M, *et al.* 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media[J]. *Plant and Soil*, 337(1/2): 481-496
- 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 2011. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. *中国农学通报*, 27(15): 16-25
- 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 2013. 生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估[J]. *环境科学*, 34(6): 2486-2492
- 金国柱, 马玉兰. 2000. 宁夏淡灰钙土的开发和利用[J]. *干旱区研究*, 17(3): 59-63
- Lefroy J. 1873. Remarks on the Chemical Analyses of Samples of Soil from Bermuda[Z]. Hamilton: Royal Gazette Office. 3-46
- Lehmann J, Joseph S. 2009. Biochar for Environmental Management: Science and Technology [M]. London: Earthscan
- Lehmann J, Pereira D S J, Steiner C, *et al.* 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 249(2): 343-357
- Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* 2011. Biochar effects on soil biota-A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9): 1812-1836
- Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 333(1/2): 117-128
- Many J J. 2012. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. *Environmental Science and Technology*, 46(15): 7939-7954
- Novak J M, Busscher W J. 2013. Selection and use of designer biochars to improve characteristics of Southeastern USA coastal plain degraded soils//Lee J W. *Advanced Biofuels and Bioproducts* [M]. New York: Springer. 69-96
- Prendergast-Miller M T, Duvall M, Sohi S P. 2014. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability [J]. *European Journal of Soil Science*, 65(1): 173-185
- Spokas K A, Cantrell K B, Novak J M, *et al.* 2011. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration [J]. *Journal of Environmental Quality*, 41(4): 973-89
- Verheijen F G A, Jeffery S, Bastos A C, *et al.* 2010. Biochar Application to Soils: A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions[M]. Ispra, Italy: Joint Research Centre
- Wang Z, Xu Y, Zhao J, *et al.* 2011. Remediation of petroleum contaminated soils through composting and rhizosphere degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1/3): 677-685
- 王震宇, 徐振华, 郑浩, 等. 2013. 花生壳生物炭对中国北方典型果园酸化土壤改性研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 43(8): 86-91
- 袁金华, 徐仁扣. 2012. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. *土壤*, 44(4): 541-547
- 袁艳文, 田宜水, 赵立欣, 等. 2012. 生物炭应用研究进展[J]. *可再生能源*, 30(9): 45-49
- 张福锁. 1993. 植物根引起的根际 pH 值改变的原因及效应[J]. *土壤通报*, 24(1): 43-45
- 张明月. 2012. 生物炭对土壤性质及作物生长的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学
- 张千丰, 王光华. 2012. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. *土壤与作物*, 1(4): 219-226
- 张伟明. 2012. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学
- 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 2013. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 39(8): 1445-1451
- 张喜娟, 孟英, 唐傲, 等. 2013. 功能性材料生物炭的农田应用效应[J]. *作物杂志*, 1(4): 20-24
- Zheng H, Wang Z, Deng X, *et al.* 2013a. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, 206: 32-39
- Zheng H, Wang Z, Deng X, *et al.* 2013b. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 130: 463-471
- 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 2010. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 19(11): 2713-2717